

光放射標準と計測技術の研究；測光・放射標準 (Recent Status of the Development on Photometric and Radiometric Standards)

量子放射部

小貴英雄, 齊藤一郎, 部 洋司, 側垣博明, 三嶋泰雄

The ETL is responsible for establishment and supply of national standards for photometry and radiometry, such as luminous intensity (candela), luminous flux (lumen), illuminance (lux), distribution temperature, spectral radiance, spectral irradiance, and spectral responsivity. We deal with recent developments of luminous intensity and luminous flux standards based on a cryogenic radiometer, spectral responsivity, and precise measurement technique of absolute reflectance in this report.

はじめに

電子技術総合研究所(以下,電総研)は,測光・放射標準の研究および標準の設定,維持,供給を行っている日本唯一の国立機関であり,測光標準量(光度,光束,分布温度,照度),放射標準量(分光応答度,分光放射照度,分光拡散反射率等)に関する設定研究を実施している。

更に計量法のトレーサビリティに基づき光度,光束,分布温度,照度,分光放射照度の特定標準器を設定し標準の供給を行っている。分光応答度に関しては依頼試験により対応している。

ここでは, 1. 極低温放射計に基づいた新たなる光度・光束単位の設定, 2. 計量法による分光応答度の供給を目指した分光応答度供給システム開発, 3. 分光拡散反射率の高精度測定技術の開発について述べる。

1. 極低温放射計に基づいた新たなる光度・光束単位の設定

1.1 基本単位(カンデラ)の定義

国際単位系(SI)の7つの基本単位に含まれる光度の単位カンデラ(記号cd)の定義は,1979年の第16回国際度量衡総会で採択され,「カンデラは,周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し,所定の方向におけるその放射強度が $1/683$ ワット毎ステラジアンである光源の,その方向における光度である」となった(日本においても新計量法に新定義がとり入れられた)¹⁾。旧定義は,

白金凝固点の温度にある黒体からの放射を標準にしてカンデラの単位を定義していた。新定義は標準光源,標準検出器といった特定の標準器にたよらず,周波数 540×10^{12} Hz(波長555nm)の単色放射に対して,他のSI単位から導かれた物理量を用いて定義され,厳密な計測が行えることとなった。しかしながら555nm以外の波長あるいは広い波長分布を持つ光源の光度を求めるには,人間の目の分光感度を標準化・規格化した分光視感効率 $V(\lambda)$ を併用しなければならない。

したがって測光量は $V(\lambda)$ というフィルタをかけた放射エネルギーの測定と考えてよい。実際に測定されるものは,人間の視感波長領域360~830nmについて積分した

$$F = K_m \int_{360\text{nm}}^{830\text{nm}} V(\lambda) \phi_e d\lambda$$

$$K_m = 683 \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \quad \phi_e = \text{放射束(単位: W)}$$

の量で,この量を光束ルーメン(記号lm)とよび他の全ての測光量の基本となる。量としては光束が基本であるが,単位としては光度カンデラ(cd)が基本となっている。

測光量としては基本単位の光度と光束,照度ルクス(記号lx)が用いられる。光度は定義で示されているが,発光面を頂点とした単位立体角に含まれる円錐形内の光束の量 $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$ で表される。光束の単位はすべての方向に1cdの光度をもつ光源が,立体角1sr内に放出する光束と定義されている。光を受けとる側(発光面)の測光量である照度は,その点を含む単位面積あたり

に入射する光束の量 $lm \cdot m^2$ で表される。照度 lx は、面積1平方メートルあたりに、光束1ルーメンの割合で光が入射していることを示している。また照度 E は発光面と受光面との距離 l (単位: m) との逆二乗則と光度 I から、

$$E = I/l^2$$

と表すことが出来る。

このように測光量は他のSI基本単位と異なり基本量である光度単位を具現するに当たり光度、光束、照度の三つの単位が相互に密接な関係で結びつく特殊な量であるといえる。

1.2 新たな光度・光束単位の設定

光度の定義に基づき光度単位を具現するには、高温黒体炉等の放射源、あるいは電力置換型放射計等の検出器を用いる二つの方法がある。温度目盛の精度の影響を受ける黒体炉に対して、電力置換型放射計は入射パワーと置換電力との等価性が問題となるがキャビティを極低温(液体He温度)に保つことにより良好な等価性を実現できることから、各国の標準機関において光度単位を具現するために導入・使用されている。電総研においても1994年に導入し、光度単位はもとより測光・放射諸単位設定の基準とすべく研究を行っている。

その結果、極低温放射計により得られる高精度な分光応答度に基づき、新たな光度・光束単位を設定することが出来た。

1.2.1 極低温放射計

極低温放射計は、キャビティ部を動作温度4.5K一定(Heバス温度は4.3K)に保ち液体Heを1回4 $\frac{1}{2}$ 充填することで36時間の連続測定が可能である。外観をFig.1に示す。電力置換キャビティは0.1mm厚の銅板をチューブ状に成型し内部をNi・Pメッキ後にエッチング処理により吸収率0.999981(632.8nm)を得る。感度は約1.22K/mW、時定数4.9秒、最小分解能2~5nWである。この時の電力置換精度は0.01%以下となる。入射窓には熔融石英製のブリュースタ窓を用いる。使用するレーザー群は、Ar-Kr(488.0, 568.2, 647.1nm), Ar(514.5nm), He-Ne(632.8nm)である。通常100~200 μ Wで測定を行う。

極低温放射計の分光応答度測定精度は、ブリュースタ窓の透過率測定等が加わり0.05%(1 σ)である²⁾。



Fig.1 Cryogenic radiometer

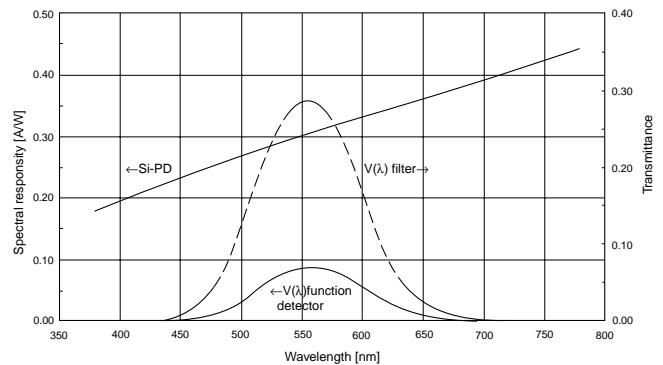


Fig.2 Spectral responsivity of Si-PD, V(λ)function detector, and transmittance of V(λ)filter

1.2.2 光度測定用検出器および光度・光束測定

光度測定用検出器は窓無しシリコンフォトダイオード(以下、Si-PD)(S1337-1010)を用い、V(λ)フィルタ、精密マスク(6.00357mm径)より構成される。Si-PDは極低温放射計より分光応答度の校正を直接行う。この分光応答度を可視域全域に拡大し(内、外挿)、次に分光器を用いてV(λ)フィルタを組み込んだ検出器に可視域5nm間隔の絶対分光応答度(A/W)を値付けする。更に検出器光出力-照度(A/Lx)を計算により求める。Si-PDのみの分光応答度とV(λ)フィルタを組み合わせたときの分光応答度をFig.2に示す。

光度標準電球(東芝:コイルM字型, オスラム:Wi41G)は、光度測定用検出器を用い測光距離2.3107mで測定を行い、距離の逆二乗則より光度値を決定した³⁾。

光束の測定は、上記の方法により得られた光度単位

に基づき配光測定装置(電球－検出器：腕の回転半径1.5m)を用いて全光束標準電球(東芝：100V200W, NPL/GEC：200WLPS)の測定を5度間隔で全空間の光度を測定することにより得た。

光度の測定精度は0.28% (1 σ), 光束の測定精度は0.34% (1 σ)である。

1.3 光度・光束の国際比較

国際度量委員会(CIPM)測光放射測定諮問委員会(CCPR)主催による基幹国際比較(Key-Comparison)の一環として,光度(CCPR-K3a)ならびに光束(CCPR-K4)の国際比較が中央局(PTB)により1997-1999に実施された。電総研も新たに設定を行った光度・光束単位を用い国際比較に参加した。参加17機関のうち6機関が極低温放射計を基準にして仲介用標準電球に値

をつけている。同国際比較にはCCPR主催の国際比較としては最初にKey Comparison reference value(KCRV)が導入された。電総研のKCRVからのはずれは1999年12月の最終報告⁴⁾より光度で-0.09%, 光束で+0.18%である。各国の結果をFig.3に示す。

1.4 今後の展望

国際比較で得られた結果を国内供給値に反映させるべく計量法に基づいて供給を行っている光度・光束値を改定予定である。

V(λ)フィルタを用いた光度測定は,フィルタの温度,経年変化から0.1% (1 σ)の測定精度が限界と考えられ,極低温放射計の精度を有効に利用していると言えない。更なる高精度測定を目指し,分光放射測定法の可能性を検討する。

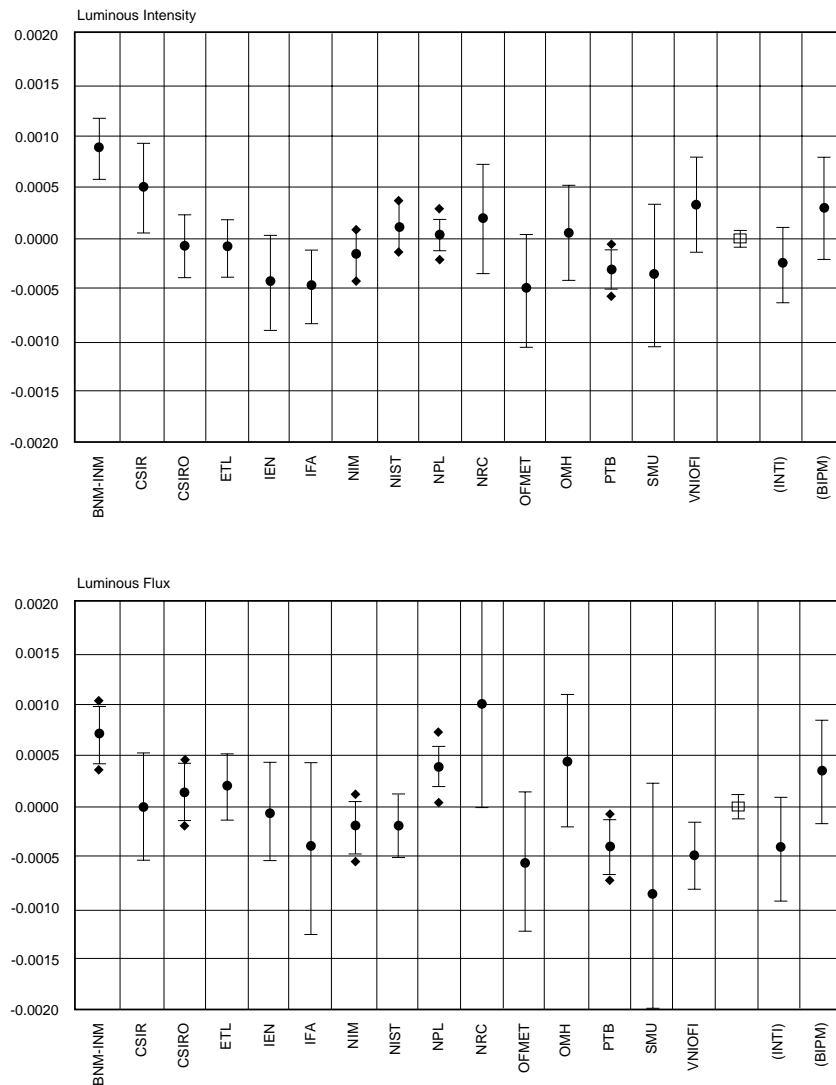


Fig.3 Luminous intensity and Luminous flux values of NMIs from KCRV

2. 分光応答度供給システムの開発

極低温放射計を基準に用いることにより測光量のより高精度化が可能となることは、光度・光束単位の設定を見れば明白である。また極低温放射計から直接得られる絶対分光応答度標準は従来依頼試験で供給されている分光応答度標準と比較して、より高精度な標準供給が可能となる。しかしながら、極低温放射計は基本的にレーザーを光源として使うために得られる分光応答度値は特定波長のみとなる。レーザー波長間および紫外域ならびに近赤外域の分光応答度を的確に補間し、連続波長帯域を再現性、精度を保証した値の供給を実施できる測定システムを現在構築している。

2.1 分光応答度供給システムの概略

計量法のトレーサビリティに基づいた分光応答度の供給範囲はSi-PDを用い、波長範囲250～1150nmを5nm間隔で絶対分光応答度(A/WまたはV/W)の値付けを行うことを目指し分光測定装置を整備中である。

分光測定装置はグレーティング・グレーティング(各3枚)のダブル分光器を主要部とし、動作可能波長範囲は200～2500nmである。内蔵光源にはハロゲンランプならびに光出力安定化を図ったXeランプをもつ。仲介用検出器としてSi-PD、二種類のInGaAsを備え半導体検出器を用いることができる全波長帯域における測定を考慮した。試料室には比測定検出器を任意位置に設定することが可能なXYZθ軸微動装置を設けた。分光応答度供給システムの外観をFig.4に示す。

2.2 今後の問題点,展望

分光応答度の供給における問題点としては、レーザー波長点間を繋ぐ高感度な波長選択性の無い良好な検出器の開発が不可欠である。この検出器が良好な結果をもたらせば紫外域・近赤外域に測定領域を拡大することも容易になる。

将来的にはInGaAs等を供給用検出器とし、～1900nmあるいは～2500nmへの長波長域の波長拡大を行うことにより、放射源側の標準である分光放射照度(250～2500nm)とバランスがとれた波長範囲の供給を目指す。

3. 分光拡散反射率の高精度測定技術の開発

3.1 緒言

近年の情報通信技術の飛躍的な進歩により、OA機器やプリンターでの色情報の国際整合性が重要視されている。これに伴い、色彩関連工業界においては色彩基準の確立とそのトレーサビリティの構築が強く求められるようになった。色彩基準はCIEの定めた標準色票によって規定されてきたが、色票のトレーサビリティを構築するためには、色票のXYZ表色系での値を、基準分光反射率を有する標準白色板を用いて校正することが必要となる⁵⁾。また、従来から分光光度計などの測定機器の校正には硫酸バリウムやセラミックタイルが標準白色面として用いており、白色標準供給の要望は多い。このような背景から、CCPR(測光放射測定諮問委員会)は、1997年に可視域の分光拡散反射率を基幹国際比較(Key-Comparison)に指定し、国際比

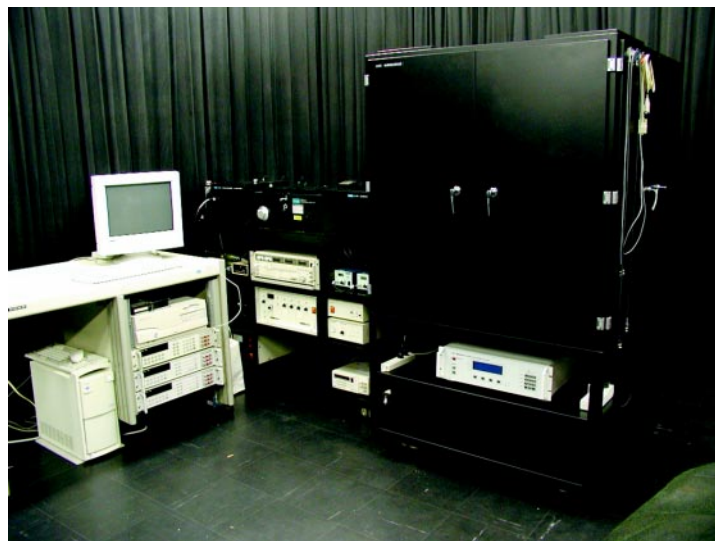


Fig.4 Spectral responsivity calibration system

較を実施することを決定した。電総研では、分光拡散反射率の絶対測定に関する研究が行われていたが、標準値を確立するには至っておらず、白色板の分光反射率国家標準の確立は急務の課題となっている。

このような状況の中、電総研では1998年より絶対分光反射率の高精度測定技術に関する研究を開始した。これは、高精度な絶対分光反射率測定方法を確立し、国際比較(CCPR-K5)に参加するとともに色彩関連工業界に国家標準トレーサブルな標準白色板を供給することを目的としたものである。

3.2 絶対反射率測定

世界の多くの国立研究機関で積分球を用いた絶対反射率測定が研究されている。積分球による絶対反射率測定の歴史は古く、これまでにいくつもの測定法が提案されてきた⁶⁾。我々は、装置系の簡便さと高精度化の可能性を考慮した上で「シャープ・リトル法」を基本原理としこれに改良を加えた新しい絶対反射率測定装置の設計・製作を行い、不確かさの評価を含めた絶対反射率測定を試みた。

3.2.1 測定原理

Fig.5にシャープ・リトル法に基づく絶対反射率測定の原理を示す^{7,8)}。開口部A₁から単色放射束Φ₀を入射し球壁Bを照射する。放射束はB上で拡散反射され球内で相互反射する。積分球内に設置された遮光板Xによって球壁CにはBからの一次反射光が達しないようにし、

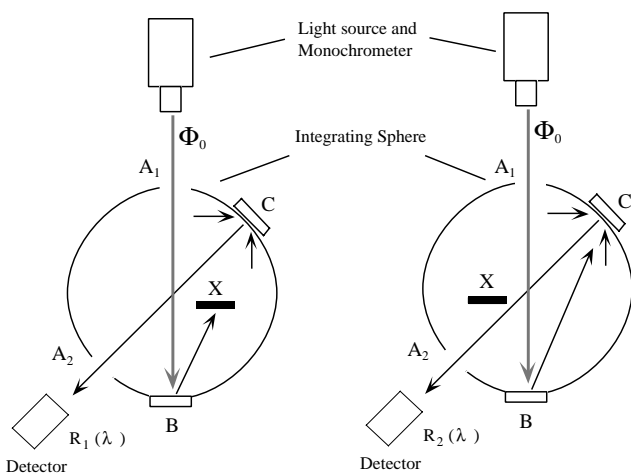


Fig.5 Schematic diagram of an instrument for measurements of absolute spectral diffuse reflectance based on Sharp-Little method

Cからの放射輝度R₁(λ)を開口部A₂から測定する。次に、同様に単色放射束が入射した状態でXを移動し、CにBからの一次反射光と相互反射光の双方が達する状態として、同様にCからの放射輝度R₂(λ)を測定する。この時、積分球の内面積をS、積分球内面の平均反射率をρ(λ)とすると、2つの放射輝度の比(R₁(λ)/R₂(λ))は、

$$\frac{R_1(\lambda)}{R_2(\lambda)} = \frac{\frac{\rho(\lambda)}{\pi} \left(\frac{\Phi_0}{S} \cdot \frac{\rho(\lambda)}{1-\rho(\lambda)} - \frac{\Phi_0}{S} \cdot \rho(\lambda) \right)}{\frac{\rho(\lambda)}{\pi} \left(\frac{\Phi_0}{S} \cdot \frac{\rho(\lambda)}{1-\rho(\lambda)} \right)} = \rho(\lambda)$$

により、積分球内面の平均反射率ρ(λ)を与える。以上より、放射輝度測定の比から平均反射率ρ(λ)が絶対値として得られることになる。

3.2.2 測定装置

測光用の内径1mの積分球に高反射率を示すといわれているEastman Kodak社製の硫酸バリウムを吹付塗装によって球全体に渡って厚さ約2mmとした。更に、積分球内に軸回転可能な支持棒を設置し、先端部に一次反射光を遮るための遮光板を付設した。支持棒及び遮光板にも同様の白色塗装を施した。

3.2.3 誤差因子の解析

積分球を用いた絶対反射率測定では、1. 余弦配光の反射、2. 球内に物体は存在しない、3. 球面上に開口部は存在しない等を前提としているため、この前提からの外れを定量的に評価し補正する必要がある。

各因子についての誤差評価を行い、余弦配光からのズレ=2.80%、支持棒と遮光板による拡散光の吸収=1.25%、開口部からの拡散光の損失=2.44%が得られ、これを基に補正係数を算出した。

3.2.4 測定の不確かさ

測定の不確かさは、検出器の安定性・補正係数の誤差・光源の安定性・計測機器の精度などに起因すると考えられる。これらについて評価を行い、絶対反射率測定における不確かさを見積もった。

検出器や光源の安定性については、放射輝度測定のデータの散つきから、波長400~425nmで±0.50%、450~750nmで±0.20%と求められた。

補正係数の誤差は、誤差因子の測定における値の散

つきから換算して、 $\pm 0.25\%$ と求められた。

計測機器の精度に関しては、他の不確かさよりも桁ほど小さいため無視できると考えた。

更に、上記以外の誤差要因として、積分球内面の反射率の散つきが考えられる。絶対反射率測定では、積分球内面の平均反射率が絶対値として得られる。しかし球全体の平均反射率という形では校正に使えないため、内壁の一部を取り出せるようにしておき、これを標準白色板として用いる。ここで、得られた平均反射率と取り出した標準白色板の反射率の関係が非常に重要である。積分球内面が均一で反射率が一樣であれば、両者は同一と考えられる。しかし、球内の反射率分布が不均一な場合、両者の相関を定量的に求める必要があり、その不確かさが大きく影響してくる。測定に用いた積分球内面の不均一性を評価するために、積分球の5箇所を取り外し部分における分光反射率(相対値)を測定し、その分布から球全体の反射率の散つきを推定した。その結果、 $400\sim 425\text{nm}$ で $\pm 1.36\%$ 、 $450\sim 750\text{nm}$ で $\pm 0.58\%$ と求められた。この不均一性に基づく不確かさは、少なくとも $400\sim 425\text{nm}$ で $\pm 1.20\%$ 、 $450\sim 750\text{nm}$ で $\pm 0.50\%$ と見積もられ、最大の不確かさの要因となってしまうことが分かった。

以上より、一連の絶対反射率測定による暫定的な標準値の不確かさは、波長 $400\sim 425\text{nm}$ で $\pm 1.32\%$ 、 $450\sim 750\text{nm}$ で $\pm 0.59\%$ (いずれも 2σ)と求められた。

3.3 実用標準白色板への値付け

標準白色板の絶対反射率の他に、校正用の実用標準

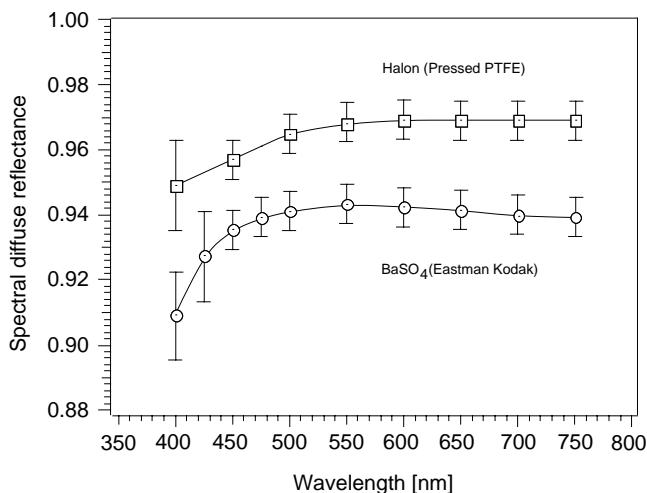


Fig.6 Spectral diffuse reflectance of Eastman Kodak barium sulfates (BaSO_4) and Halon plate

白色板にも分光反射率を値付けする必要がある。実用標準は、経年変化の小さいものが望ましい。電総研ではハロンに分光反射率を校正して供給することを検討している。ハロンは、四フッ化エチレン樹脂(PTFE)を組成としこれを圧縮形成して得られる白色の樹脂であり、優れた反射特性を有している⁹⁾。

標準白色板からの反射率校正は、二光束式の積分球を用いた比較測定装置によって行う。硫酸バリウムの絶対反射率をもとにして、比較測定装置を用いてハロンに分光反射率を値付けした。比較測定に於ける再現性は、 $400\sim 425\text{nm}$ で $\pm 0.30\%$ 、 $450\sim 750\text{nm}$ で $\pm 0.15\%$ であった。これより、絶対値の不確かさと併せ、実用標準白色板の不確かさは、波長 $400\sim 425\text{nm}$ で $\pm 1.35\%$ 、 $450\sim 750\text{nm}$ で $\pm 0.60\%$ (いずれも 2σ)と求められた。

一連の絶対反射率測定によって暫定的に得られた硫酸バリウムの絶対反射率と、それを元に校正されたハロンの分光反射率を Fig.6 に示す。

得られた値の整合性を確認するために、1999年にNISTとの二国間比較を実施した。その結果、両国の分光反射率は約 0.50% 以内の差で一致し、一連の絶対反射率測定と補正係数の算出法の妥当性が示されたといえる。しかし、現時点での絶対反射率は「積分球内面の不均一性」による不確かさが大きく、暫定値の域を出ない。国際レベルでの精度要求を満たすためには更なる改善策の検討が必要である。

3.4 今後の課題

積分球を用いた絶対反射率測定では、内面の均一性が測定精度を大きく左右することが分かった。そして、多くの測光用積分球は球内面が必ずしも一樣ではなく、絶対反射率測定に関しては、大きな不確かさを伴うことが明らかとなった。このことから、高精度な絶対反射率測定の実現には、1. 均一な球内面を持つ積分球と2. 積分球内の反射率分布の評価法の確立が必要であることが分かった。

均一な球内面の実現に関しては、塗装方法を検討することによって改善が期待される。また、ハロンのような安定な白色材料を積分球の内壁面として用いることも有効と思われるが、ハロンなどの樹脂は球形状への加工が困難であり、更なる検討が必要であると思われる。均一性の評価方法については、NPLやNISTなどで、レーザープローブを用いた積分球内の反射率分

布測定が試みられている^{10,11)}。

ここで得られた知見をもとに今後、積分球の改良とその評価方法の確立、新しい絶対反射率測定法の開発研究など進め、国際レベルの分光反射率標準を確立し、更なる高精度化・波長域の拡大なども視野に入れながら研究を展開していく予定である。

参考文献

- 1) 国際単位系：国際文書第7版（1999年）日本語訳 日本規格協会
- 2) 齊藤,小貫：照学全大講演論文集p.288 (1996)
- 3) 齊藤,小貫：照学全大講演論文集p.251 (1998)
- 4) G. Sauter et al. : PTB-Opt-62(1999)
- 5) JIS Z8722-1981「物体色の測定方法」
- 6) W. Budde : J.Res. Natl. Bur. Stand. **80A** (1976) 585
- 7) C.H. Sharp and W.F. Little : Trans. Illum. Eng. Soc. **15** (1920) 802
- 8) W. Budde and C.X. Dodd : Die Farbe **19** (1970) 94
- 9) V.R. Weidner and J.J. Hsia : J.Opt.Soc.Am **71** (1981) 856
- 10) Y. Ohno : Metrologia **35** (1998) 473
- 11) J.F. Verrill, A.R. Hanson and P.C. Knee : NPL Report COEM3 (1997)